



Evaluación de los cambios en la morfología y tamaño de fibras de crisotilo de mina La Bélgica (Calamuchita, prov. de Córdoba, Argentina) simulado en ensayos de laboratorio

Lescano, Leticia ¹⁻² ✉ - Marfil, Silvina ¹⁻³ - Maiza, Pedro ¹⁻⁴ - Sfragulla, Jorge ⁵⁻⁶ - Bonalumi, Aldo ⁵⁻⁶

Recibido: 12 de mayo de 2011 • Aceptado: 05 de noviembre de 2011

Resumen

El crisotilo es un mineral del grupo de la serpentina que se desarrolla a partir de la alteración de olivinos, piroxenos y anfíboles. Posee una estructura en donde las capas de silicato se disponen en forma de tubos o cilindros concéntricos o enrollados. Esto genera el hábito característico de los minerales asbestiformes.

El crisotilo se ha utilizado en numerosos productos industriales. Sin embargo a su gran utilidad hay que considerar su alta toxicidad ya que puede producir enfermedades pulmonares, tales como mesotelioma o asbestosis, de forma directa o indirecta. La exposición al asbesto puede ser de tres fuentes conocidas: laboral, doméstica y ambiental. Las fibras pueden pasar al aire o al agua no sólo debido a la degradación de los productos manufacturados sino también por la movilidad de estos minerales desde los depósitos naturales.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación de los cambios morfológicos y de tamaño de las fibras de crisotilo muestreadas en campo, simulando en laboratorio condiciones naturales. A partir de los resultados obtenidos se evaluó la degradación del mineral en el tiempo en condiciones variables y se analizó cómo las fibras modifican su tamaño y morfología hasta alcanzar las condiciones críticas para la salud humana.

Palabras clave: asbestos, degradación, salud humana.

1 Departamento de Geología-UNS. San Juan 670, Bahía Blanca. C.P.8000.TE. 54-291-4595101 int. 3021

2 Becaria Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As.

✉ leticia.lescano@uns.edu.ar

3 Investigador Principal CONICET-INGEOSUR.

4 Investigador Independiente. Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As - INGEOSUR.

5 Secretaría de Minería, Provincia de Córdoba, Hipólito Yrigoyen 401, 5000, Córdoba, Argentina.

6 Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av.Vélez Sársfield 1611, 5016, Córdoba, Argentina.

Abstract

Chrysotile is the fibrous mineral of the serpentine group, which is developed from the alteration of magnesium silicates, olivine, pyroxene and amphibole especially. The sheet structure is curved into scrolls or hollow cylinders that form individual fibers, which are responsible for its properties as asbestos.

Chrysotile has been used extensively in industrial materials, however, asbestos inhalation can cause lung diseases such as mesothelioma and asbestosis.

Exposure to asbestos can be from three different sources: laboral, domestic and environmental. Asbestos fibers can be introduced into the air or natural water from the erosion of rocks rich in asbestos asbestos, manufactured materials, or disposal of industrial asbestos wastes.

The purpose of this paper is to study morphologic and size changes of fibers, simulating exogenous conditions in laboratory. To determinate the degradation of the mineral in in natural conditions in the course of time and to analyze how the fibers modify their size and morphology until the critical for human health are reached.

Keywords: asbestos, degradation, human health.

INTRODUCCIÓN

Dentro del grupo de la serpentina se reconocen tres silicatos hidratados de magnesio que poseen fórmula química similar ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) pero diferente estructura cristalina: lizardita, antigorita, y crisotilo (Winchell 1933; Hurlbut 1974; Anthony et al. 1995; Ross 1981; Wicks 1979). Este último presenta características asbestiformes con fibras flexibles, elongadas y curvadas. Se forma a partir de la alteración de olivinos, piroxenos y anfíboles. Este mineral, también conocido como asbesto blanco debido a su color, posee una estructura en donde las capas se disponen en forma de tubos o cilindros concéntricos o enrollados (Wicks y Whittaker 1975), generando el hábito característico de los minerales asbestiformes del grupo de la serpentina.

En cuanto a sus propiedades se destacan la resistencia al calor, al desgaste, a los álcalis y ácidos y su flexibilidad, que lo hacen un material adecuado para ser empleado como aislante en numerosas industrias. Debido a estas propiedades fue mundialmente utilizado en una gran variedad de productos, sin embargo, a su gran utilidad, hay que añadir su peligrosidad ya que puede producir enfermedades de forma directa o indirecta, en especial a largo plazo, pues tiene una latencia superior a veinte años (Abú-Shams et al. 2005). La penetración del asbesto en las vías respiratorias hace que las fibras se acumulen en los pulmones y puedan desarrollar cáncer o asbestosis. (Battista et al. 2006). Los numerosos estudios que se han realizado en relación a los asbestos están relacionados a la morfología y tamaño de los mismos y a las implicancias que esto genera en la salud humana.

La exposición al asbesto puede ser: laboral, doméstica o ambiental. Desde el punto de vista ambiental afecta principalmente a las personas que residen cerca de un punto de emisión de asbesto e inhalan el polvo disperso en el aire. Las fibras pueden pasar al aire o al agua no sólo por la degradación de los productos manufacturados sino también por la erosión de depósitos naturales. El agua potable puede contener asbesto procedente de fuentes naturales o de tuberías de fibrocemento que lo contienen. Las fibras y las partículas de diámetro pequeño pueden permanecer suspendidas en el aire durante largo tiempo y ser transportadas grandes distancias por el viento y el agua antes de depositarse. No pueden movilizarse a través del suelo permaneciendo inalteradas durante largo tiempo dado que no son degradadas a otros compuestos (Luis, G. et al. 2009).

En proximidades a la mina La Bélgica (Calamuchita, Prov. de Córdoba) se encuentra la villa turística Yacanto de Calamuchita. Esta localidad ha comenzado a expandirse en los últimos años y dado la fácil movilidad que presenta el crisotilo, tal como pudo reconocerse en el campo y se comprobó a partir de los

ensayos de simulación realizados en laboratorio, se considera importante evaluar la posible exposición ambiental de asbesto, de tamaño crítico para la salud, de las personas que residen en la localidad.

Durante 30 años, mina La Bélgica fue explotada por amianto y sus productos han sido industrializados y comercializados. En la actualidad existen numerosos productos que aún contienen este material y se los considera perjudiciales para la salud humana. La degradación de los mismos es uno de los factores por los que las fibras penetran con mayor facilidad en las vías respiratorias relacionado a su cambio morfológico y reducción de tamaño. Es indispensable estudiar estos materiales y su degradación en el tiempo relacionado a su influencia nociva de forma directa o indirecta, en especial a largo plazo.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación de los cambios morfológicos y de tamaño en fibras del crisotilo de mina La Bélgica, simulando en el laboratorio condiciones naturales. Se determinó la evolución de la degradación del mineral en el tiempo y se analizó cómo las fibras modifican su tamaño y morfología hasta alcanzar tamaños críticos para la salud humana.

MARCO GEOLÓGICO

El crisotilo utilizado fue obtenido en Mina La Bélgica. Se ubica en el Departamento Calamuchita, provincia de Córdoba, Argentina, en el sector oriental de las Sierras Grandes en cercanías de la Estancia San Miguel, entre las localidades de Villa Yacanto y Atos Pampa (Figura 1). Esta mina fue denunciada por amianto en el año 1947 y su explotación a cielo abierto se extendió hasta fines de los años 70'. En la actualidad se encuentra abandonada y ha sido dada de baja como mina por la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba.

El cuerpo de serpentinita La Bélgica pertenece a la denominada Faja Central de rocas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Villar 1975, 1985) posteriormente llamada Faja Ultramáfica Occidental (Kraemer et al. 1995). Se presenta como una serie de cuerpos aislados que se extienden al sur del Batolito de Achala, desde Los Permalentes por el sur, hasta la localidad de Inti Yaco por el norte. En el sector estudiado, las rocas ultramáficas se presentan emplazadas como lentes dentro de las rocas anatócticas que forman el macizo de Atos Pampa-Cerro Pelado (Bonalumi y Gigena 1987). La geología del cuerpo La Bélgica fue estudiada por Escayola (1994, 1997); dicha autora describe serpentinitas derivadas de harzburgitas y websteritas que han sufrido cuatro episodios metamórficos, el último de los cuales es de tipo retrógrado asociado al dominio frágil, con circulación de fluidos en fracturas y que generó rellenos de crisotilo y talco.

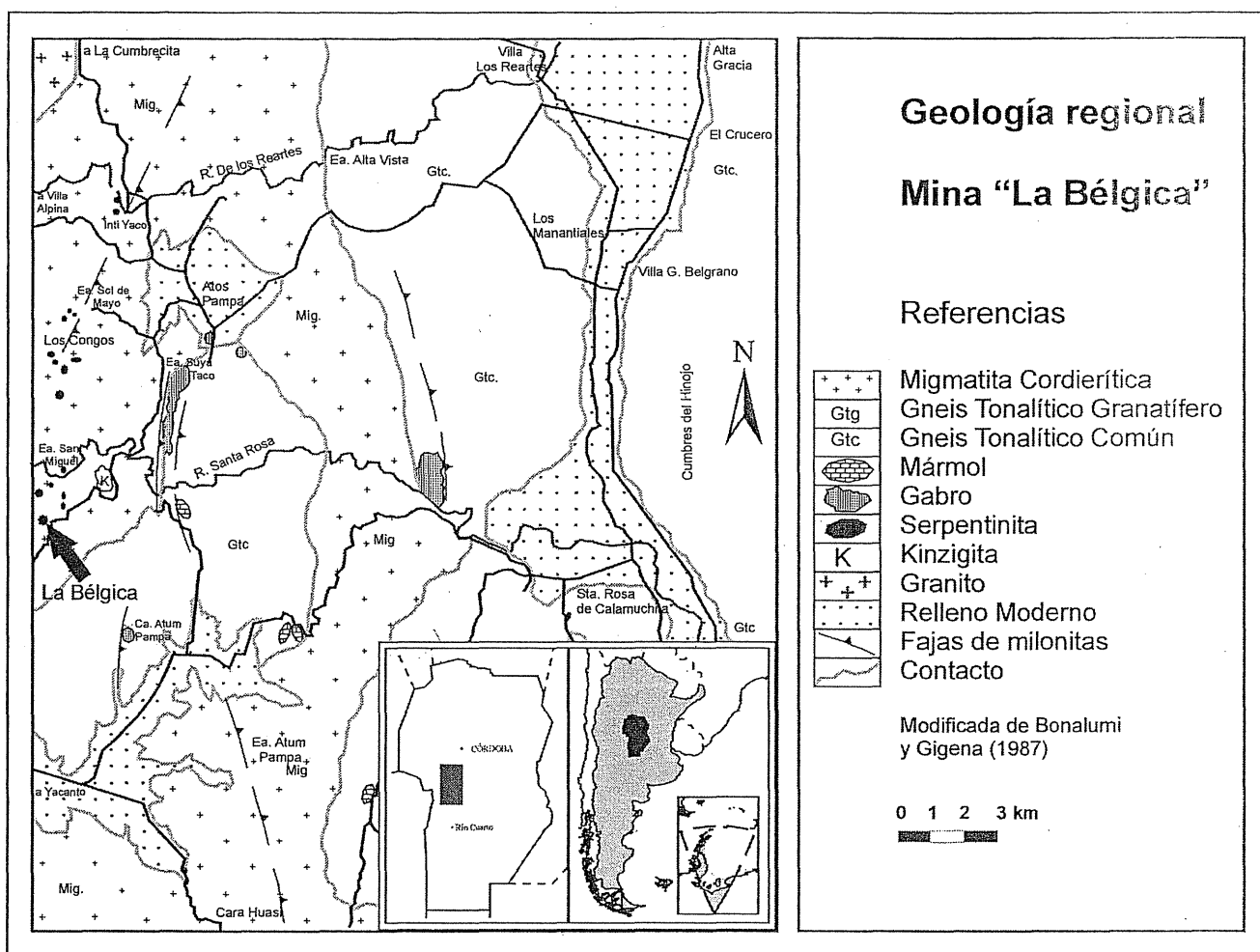


Figura 1. Mapa de ubicación de Mina La Bélgica.

El crisotilo presenta hábito asbestiforme con fibras que superan los 2 cm de largo (Bonolumi y Gigena 1987) y que crecen perpendicularmente a las paredes de las fracturas (asbestos cross-fiber). En el campo se ha podido observar el disgregamiento in situ de las venillas de crisotilo y la volatilidad de las fibras generadas (Figura 2). En la Figura 3 se muestra un corte pulido de la serpentinita donde se reconocen las venillas de crisotilo y su hábito cristalino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para los ensayos de laboratorio se separaron fibras de crisotilo de las venillas muestreadas. Para interpretar la degradación del crisotilo en función del tiempo simulando las condiciones del ambiente natural, se utilizaron las condiciones del ensayo de envejecimiento de materiales cerámicos (Dominguez y Ullmann, 1996). Consiste en someter al material asbestiforme a 150 °C y 150 atmósferas de presión, en autoclave, durante 24 horas, controlando principalmente la pérdida de peso y las modificaciones de la superficie de las fibras. El medio usado fue agua a pH 7, en una autoclave tipo Morey con tubo portamuestra de vidrio de cuarzo fundido.

También se analizó el comportamiento del mineral sometándolo a ensayo de agitación permanente, para simular condiciones de torrentes de agua que se puedan dar en el medio natural. Se analizaron las fibras de crisotilo, su variación morfológica y de tamaño, en diferentes estadios de tiempo e intensidades de agitación.

Para estudiar el comportamiento de las fibras en el aire se diseñó un equipo, que básicamente consiste en un túnel de acrílico vertical, de longitud variable, a través del cual se hizo circular una corriente de aire a temperatura ambiente con diferentes caudales. Se usaron fibras de crisotilo en distintas condiciones para evaluar principalmente la evolución de la degradación del mineral. Si bien no es posible obtener conclusiones cuantitativas, se evaluaron las modificaciones morfológicas y de tamaño de las fibras hasta alcanzar el tamaño crítico que afecta la salud.

Para la caracterización del mineral y determinar su morfología y tamaño se utilizó un sistema microscópico, con procesador de imágenes integrado con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT; microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151A incorporada, monitor de alta resolución, procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1 y programas computarizados para tratamiento de imágenes; microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM 35 CP equipado con una sonda EDAX para el análisis químico cualitativo de microáreas sobre muestras metalizadas con oro y se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III - C con radiación de Cu K α y monocromador de grafito, con 35 KV y 15 mA. El contenido de elementos mayoritarios se analizó mediante ICP en Activation Laboratories Ltd. (AC-TLABS, Canadá).



Figura 2. Fibras sueltas de crisotilo en venillas “cross fiber” en mina La Bélgica.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

El crisotilo de mina La Bélgica fue analizado por DRX, previo al tratamiento, para su caracterización mineralógica. En la Figura 4 se muestra el difractograma obtenido donde se identifica claramente la estructura del crisotilo con sus máximas reflexiones en 7.32 y 6.64 Å, comparables con la ficha ICDD 31-808 (ICDD, 1986). Revela muy buena cristalinidad y elevada pureza.

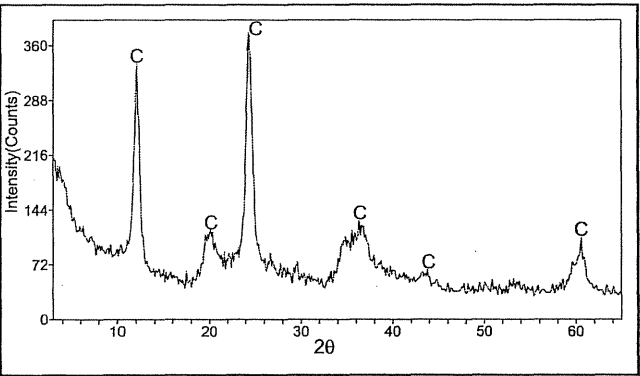


Figura 4. Difractograma de crisotilo natural. Mina La Bélgica [C: crisotilo].

Tabla 1. Análisis químico de elementos mayoritarios del crisotilo de mina La Bélgica, Córdoba.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
42,7	0,38	3,26	0,08	40,2	0,04	0,02	0,03	0,01	0,03	13,96	100,7

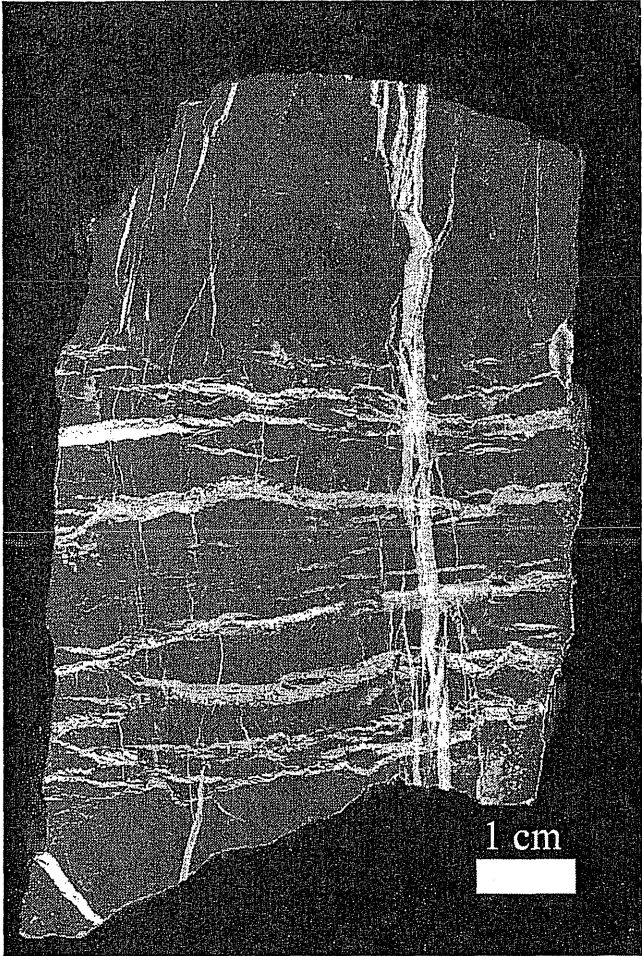


Figura 3. Corte pulido de la serpentinita con varias venillas de crisotilo cortadas por una perpendicular, de mayor desarrollo.

Sobre secciones delgadas en la serpentinita de mina La Bélgica, se reconocen venillas con texturas no-asbestiformes de crisotilo, bandeadas, paralelas a los contactos y asimétricas. También se puede distinguir un crecimiento en pulsos, venillas de carbonatos paralelas y oblicuas a la principal de crisotilo. En los bordes del carbonato se reconocen oxidados de hierro. En la serpentinita se observa una textura no pseudomórfica entrelazada, con minerales opacos (Figura 5). Las descripciones de las texturas se hicieron en base a la clasificación de O’Hanley y Wicks, 1988.

En la Tabla 1 se muestra el análisis químico de elementos mayoritarios del crisotilo de mina La Bélgica. Los resultados son comparables con los valores teóricos para este mineral. Además se observan contenidos relativamente altos de Fe₂O₃ (T), relacionado con impurezas.

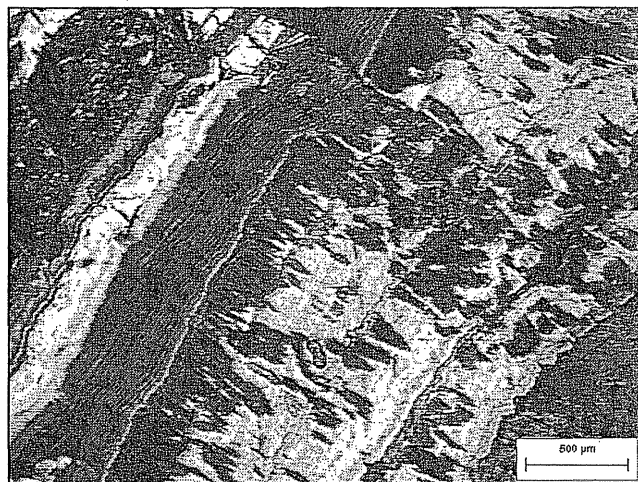


Figura 5. Venilla no-asbestiforme de crisotilo, bandeada paralela a los contactos

DISGREGACIÓN EN MEDIO ÁCUEO

Microscopía

Se estudió el comportamiento de las fibras de crisotilo en medio ácuo con turbulencia variable similares a las que se desarrollaran en torrentes de agua. El análisis fue realizado con 1 gr de muestra. La Figura 6 muestra la evolución del tamaño y forma provocada por la agitación a través del tiempo. En la Figura 6.a se muestran las fibras luego de 5 minutos de agitación a 250 RPM. Se puede comprobar que en un tiempo relativamente corto de exposición comenzaron a cambiar su morfología con una incipiente disgregación de las mismas. Con el mismo intervalo de tiempo pero con una mayor intensidad de agitación (500 RPM), las fibras mayores además de separarse entre sí, comenzaron a disgregarse en fibras del orden del micrón. A 20 minutos de agitación y 250 RPM las fibras redujeron aún más su tamaño y comenzaron a aglutinarse formando un incipiente malla (Figura 6.b). En el mismo tiempo con una mayor intensi-

Tabla 2. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el tratamiento ácuo.

Tiempo de exposición /RPM	Naturales		5' a 250 RPM		20' a 250 RPM		3 hs a 250 RPM		6 hs a 250 RPM	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	4,6	0,3	4,12	0,18	3,14	0,11	1,07	0,03
Desvío Estándar	1,2	0,15	1,1	0,12	1,3	0,08	0,72	0,04	0,3	0,019

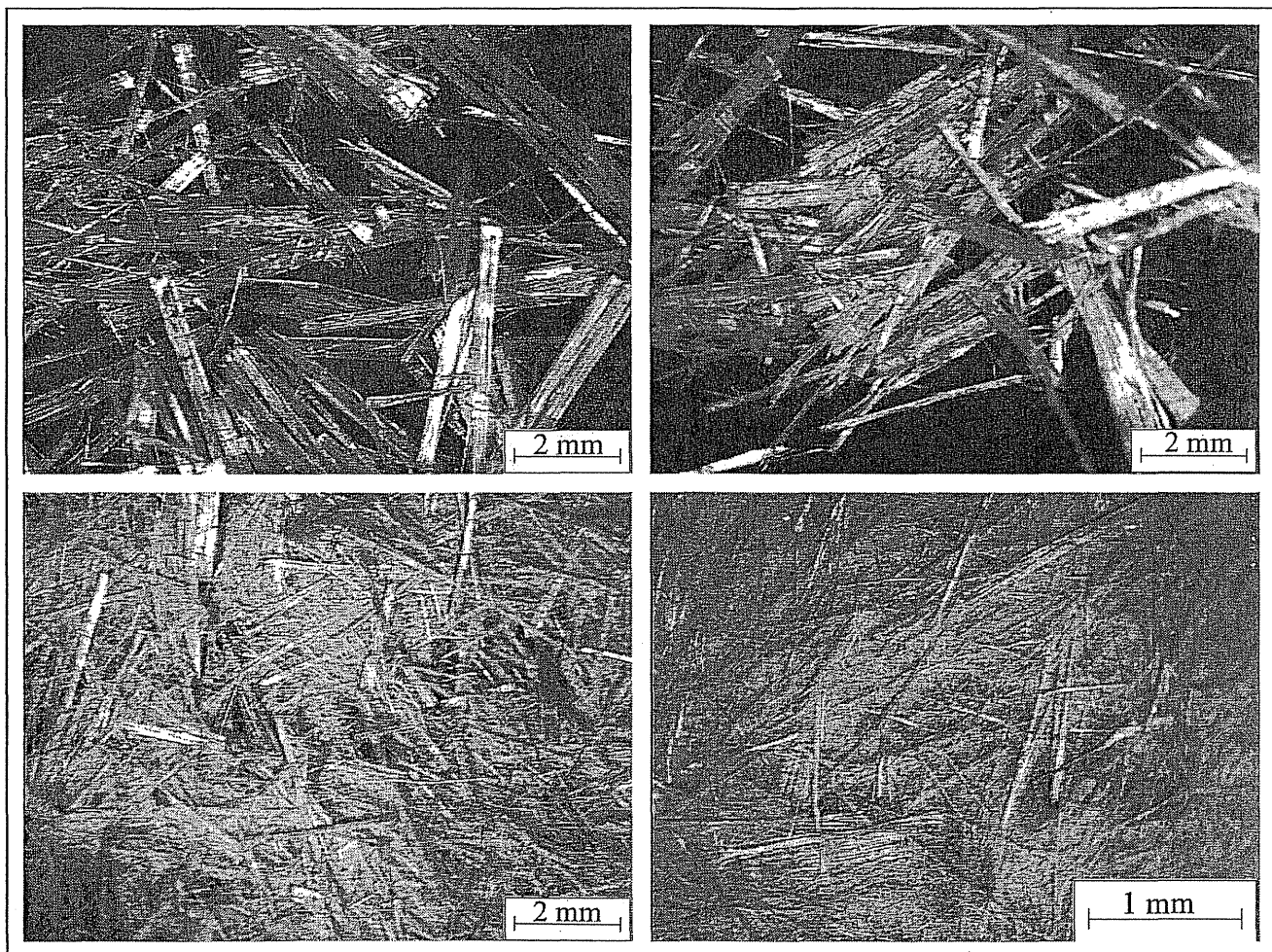


Figura 6. Evolución del tamaño y forma. Degradación por agitación. 6.a: 5 minutos de agitación a 250 RPM. 6.b: 20 minutos de agitación y 250 RPM. 6.c: 3 hrs. de agitación a 250 RPM. 6.d: 6 hrs. de agitación a 250 RPM.

dad (500 RPM), la aglutinación persiste pero ya las fibras de mayor tamaño pierden la "rigidez" inicial y comienzan a flexibilizarse en fibras menores. Pasadas las tres horas del ensayo de agitación a 250 RPM, la Figura 6.c, muestra un cambio sustancial en el tamaño y la morfología. El mallado de fibras del orden de los micrones se ha incrementado, las mismas se entrelazan de manera natural haciéndose muy difícil su separación. En la Figura 6.d, se muestra el comportamiento de las fibras luego de 6 horas de ensayo a 250 RPM. En este caso las fibras del orden del mm son escasas, el mallado de fibras micrométricas es casi total, siendo su tamaño imperceptible para el ojo humano.

En la Tabla 2, se muestra las variaciones de tamaño que se produjeron durante el tratamiento ácuo. Con el aumento de tiempo de exposición, la longitud promedio de las fibras se vio reducida en un 37% luego de 20' de tratamiento. Además, al comenzar a disgregarse, redujeron la densidad de los paquetes, observándose una disminución en el ancho de los mismos. Cabe destacar que en las muestras obtenidas luego de 3 y 6 hs de exposición, el promedio de fibras medibles no supera el 40% del total de la muestra. Esto se debe a que se genera un mallado milimétrico que no permite distinguir las fibras, como se muestra en la Figura 6.d.

Microscopía electrónica de barrido

Las fibras de crisotilo ensayadas se observaron con microscopio electrónico de barrido. Se analizó el proceso de

degradación de las mismas por agitación (Figura 7). En la Figura 7.a, se muestran las fibras de crisotilo en estado natural; son rígidas y sus extremos se encuentran fracturados. Presentan un quiebre incipiente y se separan entre sí a lo largo del eje cristalográfico "a". Luego de 20 minutos de agitación a 500 RPM, (Figura 7.b) se pudo distinguir el cambio morfológico, la reducción de su tamaño y la flexibilidad para entrelazarse de manera natural. Las de mayor tamaño aún persisten, pero se puede reconocer un incipiente fracturamiento de las mismas. A 3 hrs. de agitación, la aglutinación es mayor y el tamaño de las fibras disminuye considerablemente. La Figura 7.c muestra claramente la flexibilidad de las fibras al ser sometidas durante 6 hrs. a la agitación semejante a la de un torrente de agua, observándose que las mismas son finas, largas, flexibles y elásticas. En la Figura 7.d, con mayor magnificación se pudo reconocer como de una misma fibra se separan una gran cantidad de fibras menores.

DISPERSIÓN POR AIRE

Las fibras de crisotilo presentan un bajo peso específico, y en el aire se comportan de manera muy volátil. El ensayo se realizó con fibras calcinadas a 300° y 600°, con el objetivo de obtener un material de características físicas semejantes a las que se presentan en revestimientos de tuberías de calderas. En la dispersión se separaron unas de otras y se observó como las de mayor tamaño se separaron en fibras menores. Cabe destacar la facilidad que tienen para elevarse con una corriente de aire de bajo caudal y moverse en zonas de corrientes de aire.

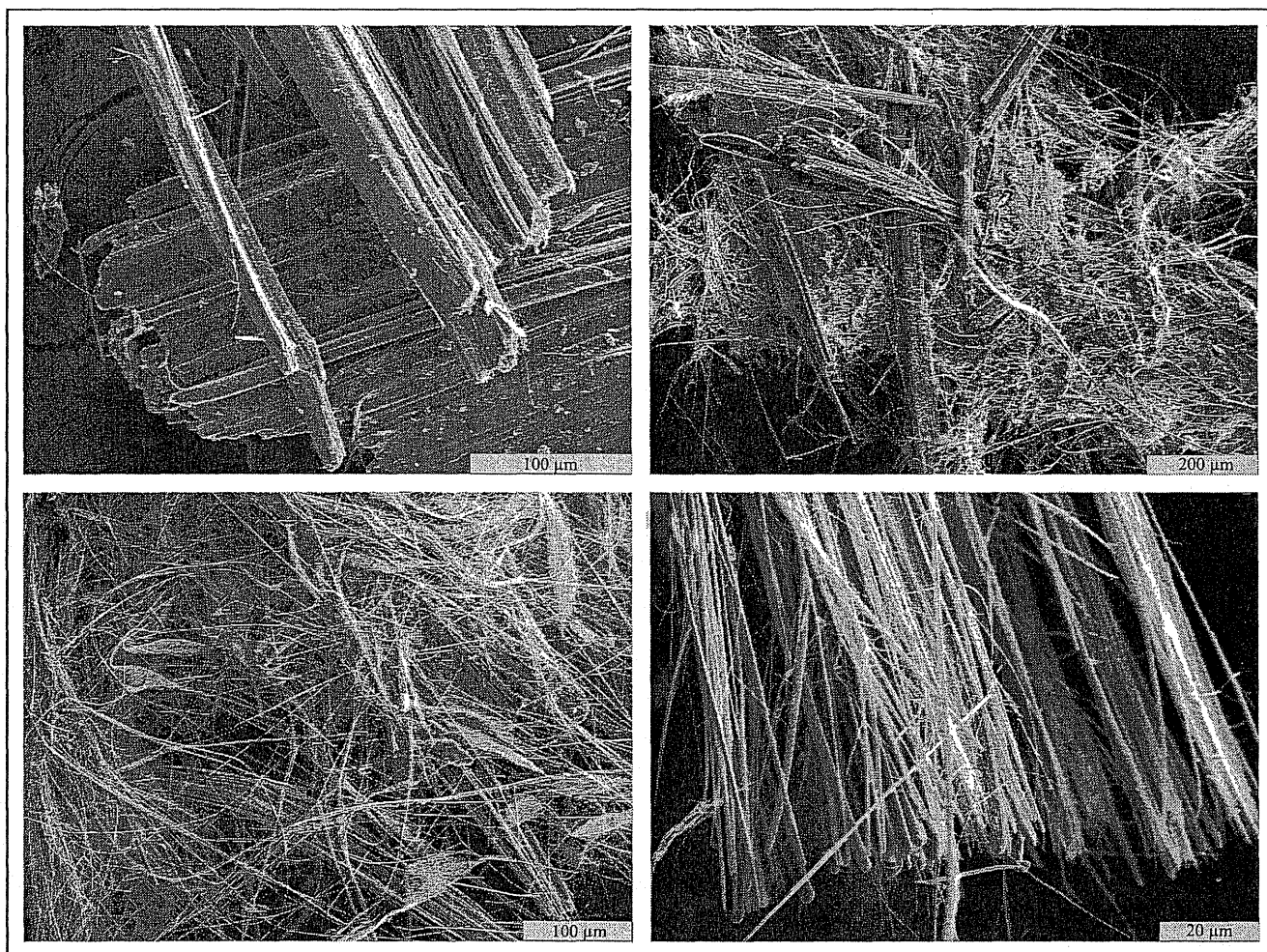


Figura 7. SEM. Degradación por agitación. 7.a: Fibras en estado natural. 7.b: 20 minutos de agitación a 500 RPM. 7.c: 6 hrs. de agitación a 250 RPM. 7.d: Detalle de las fibras de la Figura 7.c.

Por difracción de rayos X se comprobó que la composición mineralógica no se vio afectada, pero en la morfología hay un cambio sustancial de rigidez y tamaño.

En la Tabla 3, se observa las variaciones de tamaño durante la dispersión por aire. Al finalizar la experiencia, las fibras se redujeron, en promedio, un 52% en su longitud y un 80% en su ancho. Esta variación está relacionada al cambio en la rigidez inicial antes mencionado, que permite el desmenuzamiento de los paquetes naturales del crisotilo.

En la Figura 8.a se muestran los paquetes densos y rígidos de las fibras naturales pre tratamiento. En la Figura 8.b las fibras se encuentran calcinadas a 300°C, luego de una exposición a la dispersión por aire de 20'. Se observa diferentes tamaños, aglutinación y separación. En la Figura 8.c, se reconocen a las fibras previamente calcinadas a 600°C, y expuestas a 20' de aire. Es destacable la pérdida de agua y la disminución de su peso específico. Esta propiedad está íntimamente ligada a una mayor capacidad de las fibras de movilizarse en el aire. Las mismas se dispersaron fácilmente en el interior del túnel del aire y se separaron en fibras menores. Los resultados cuantitativos de la experiencia y las imágenes permitieron reconocer las modificaciones morfológicas y de tamaño alcanzando rápidamente el crítico que afecta la salud.

DEGRADACIÓN POR ENVEJECIMIENTO

Ensayo en autoclave

El crisotilo en ambiente natural se degrada con el tiempo debido a la acción de diferentes agentes que se desarrollan en la corteza terrestre. El ensayo de envejecimiento que se utilizó en esta etapa, es similar al aplicado a los materiales cerámicos. Permite observar los cambios morfológicos desarrollados durante un prolongado espacio de tiempo en el mineral, simulando las condiciones del ambiente exógeno. Las muestras se ensayaron a pH neutro, alcalino y ácido.

A pH neutro, y luego de ser sometidas al ensayo de autoclave, las fibras mostraron cambios morfológicos relacionados con fracturas perpendiculares a la elongación de las mismas (Figura 9.a), reducción de tamaño y cambios en la resistencia, generando un enlace natural de diferentes tamaños. Finalizado el ensayo se observó una leve acidificación del líquido. Como resultado de este cambio se pudieron reconocer residuos férricos (Figura 9.b), generados por la movilización del hierro contenido como impureza en las fibras de crisotilo, principalmente hematita y goetita. Estos minerales fueron determinados por DRX.

En pH alcalino, al igual que en el ensayo anterior, las fibras modificaron su morfología, observándose disgregaciones (Figura 9.c) y reducciones de tamaño. A su vez no se reconocieron cambios mineralógicos o de coloración de las fibras, ni residuos generados durante todo el tiempo de ensayo.

En medio ácido, las fibras presentaron signos de corrosión y modificaciones en la morfología. El cambio de coloración fue significativo y adoptaron tonalidades amarillentas-rojizas. Esto es debido a la lixiviación del hierro presente como impureza en el crisotilo que da lugar a la formación de hidróxidos de hierro. La disminución del tamaño de las fibras fue sustancial, llegando al orden de los micrones, aunque un pequeño porcentaje de fibras mayores resistieron al ensayo y mantuvieron tamaños que superan el mm. A su vez la morfología de las fibras se modificó, no presentaron la rigidez inicial, se curvaron y entrelazaron de manera natural (Figura 9.d).

En la Tabla 4, se muestra la variación de los tamaños de las fibras. Los tamaños en los tres ensayos se redujeron tanto en longitud como en ancho. El desvío estándar supera en algunos casos los valores promedios, relacionado a la heterogeneidad de tamaños de las fibras. A pH ácido adquieren valores muy pequeños no superando 0,5 mm en promedio. A pH neutro las fibras redujeron su longitud promedio un 83 % con respecto a las naturales.

Tabla 3. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el tratamiento de dispersión por aire.

Tiempo de exposición/T (°C)	Naturales		20' (300°)		20' (600°)	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	3,11	0,13	3,63	0,13
Desvío Estándar	1,2	0,15	1,06	0,06	1	0,09

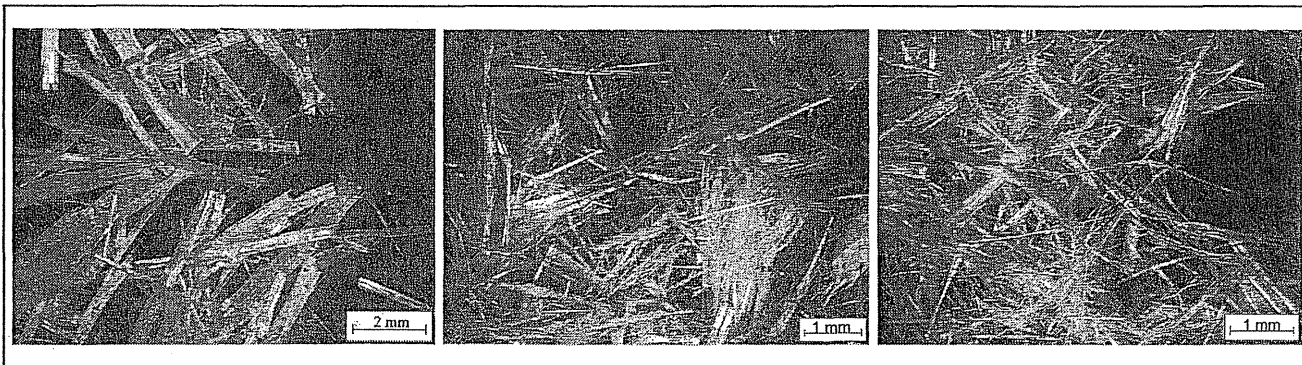


Figura 8. Dispersión por aire. 8.a: Paquetes de fibras naturales de crisotilo, pre tratamiento. 8.b: Fibras calcinadas a 300° y 20' y 8.c: 600° y 20'. Se observa separación de fibras a partir de los paquetes densos de las fibras naturales.

Tabla 4. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el ensayo de autoclave.

Autoclave	Naturales		pH neutro		pH alcalino		pH ácido	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	1,06	0,07	0,98	0,06	0,59	0,0051
Desvío Estándar	1,2	0,15	0,71	0,08	0,31	0,08	0,29	0,0028

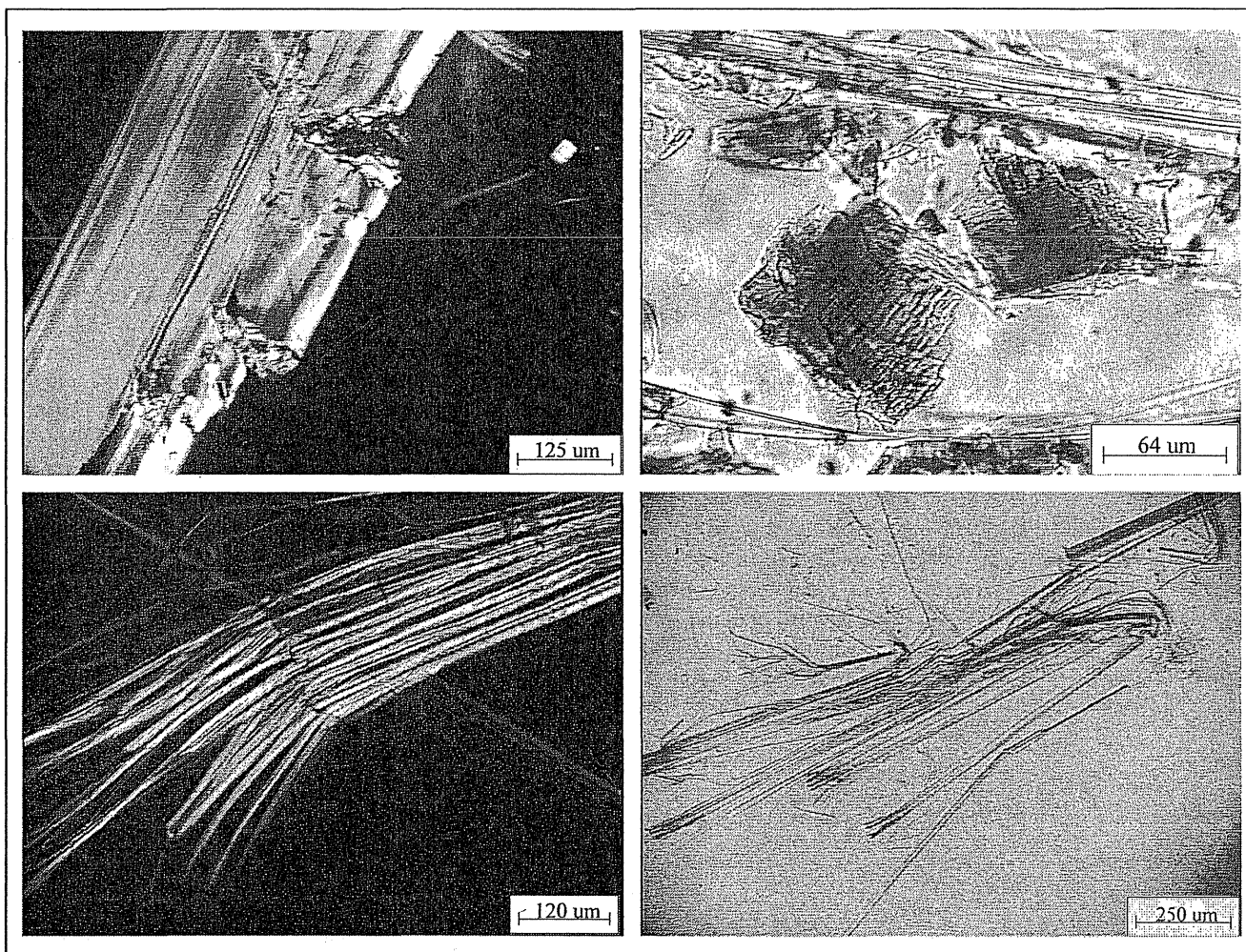


Figura 9. Ensayo en autoclave. 9.a: pH neutro. 9.b: residuo generado a pH neutro. 9.c: pH alcalino. 9.d: pH ácido

En la Figura 10, se observan las fibras sometidas al ensayo de autoclave en pH ácido, analizadas con SEM. Adquieren fragilidad y están corroídas, con un desmenuzamiento de las fibras mayores, generando un material poco homogéneo (Figura 10.a). El mineral se hidroliza y produce una fase no cristalina, que se reconoce como una pátina sobre las fibras y en algunos sectores se distinguen placas íntegramente formadas por este material. En la Figura 10.b se observa en detalle el material generado durante el ensayo en las fibras de crisotilo. En la Figura 10.c, con mayor magnificación, se muestra la fase no cristalina. Esta fue analizada mediante difracción de rayos X, obteniéndose un espectro característico de los materiales amorfos.

En la Figura 11, se comparan los difractogramas del crisotilo en estado natural, sometido al ensayo de autoclave a pH ácido y alcalino. El difractograma A corresponde al mineral en estado natural con las principales reflexiones en 3.64 y 7.32 Å comparables con la ficha ICDD 31-808 (ICDD, 1986).

El difractograma B, a pH alcalino, no presenta variaciones estructurales con respecto al crisotilo original. En el difractograma C (en medio ácido) hay reflexiones no atribuibles al crisotilo, correspondientes al residuo generado durante el ensayo. Estas reflexiones son de muy baja intensidad atribuidas a estructuras poco ordenadas e indefinidas.

CONCLUSIONES

1. A partir de los ensayos realizados, se observó que las fibras de crisotilo presentaron cambios morfológicos y de tamaño.
2. La exposición de las fibras a condiciones ácidas, en un corto período de tiempo, provocaron una modificación en la morfología, reducción del tamaño, pérdida de rigidez y aglutinación. Cuantitativamente,

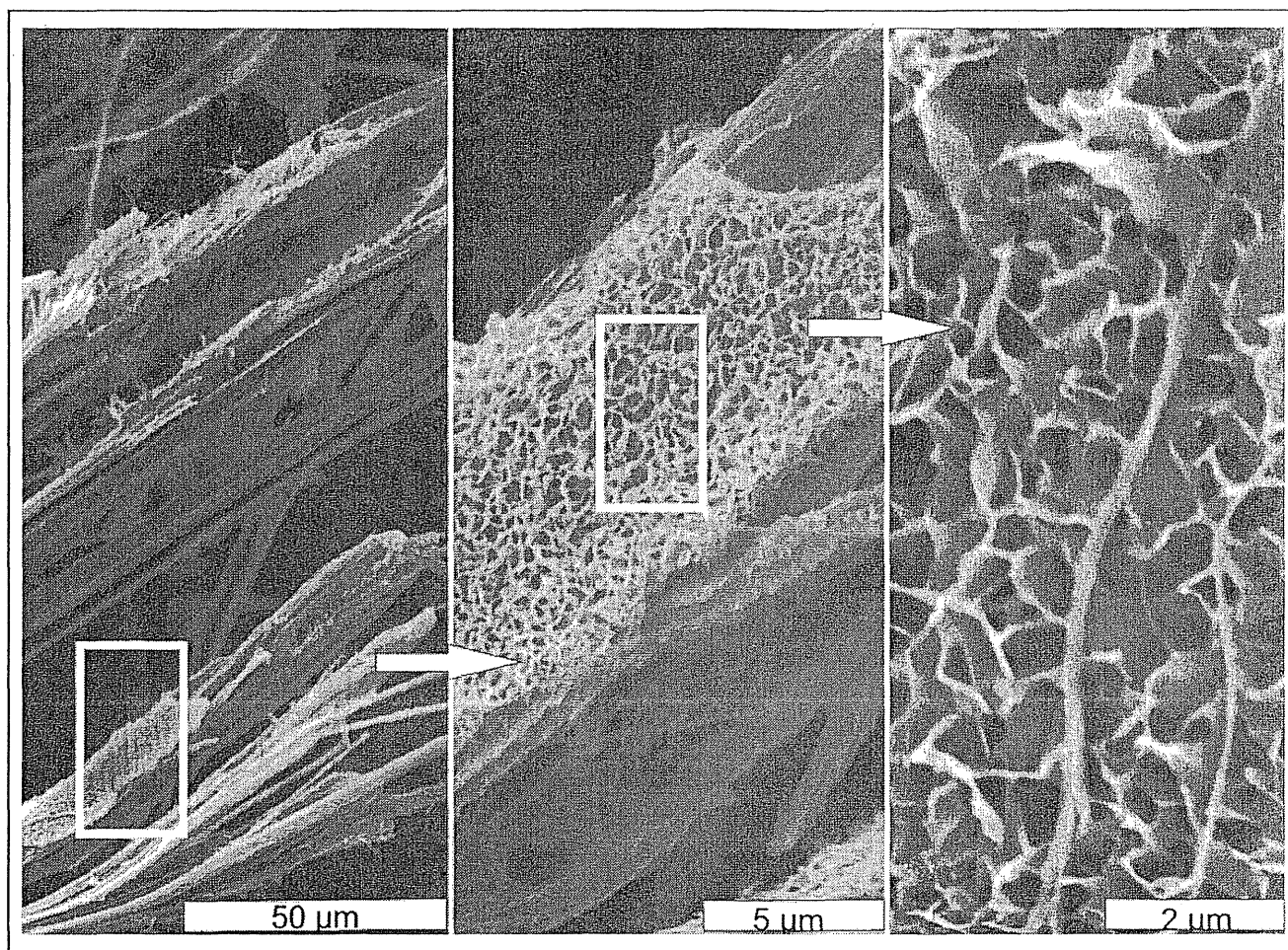


Figura 10. SEM del mineral tratado en autoclave a pH ácido. 10.a: fibras frágiles y corroidas. 10.b: Residuo originado durante el ensayo en la fibras. 10.c: detalle de la fase no cristalina.

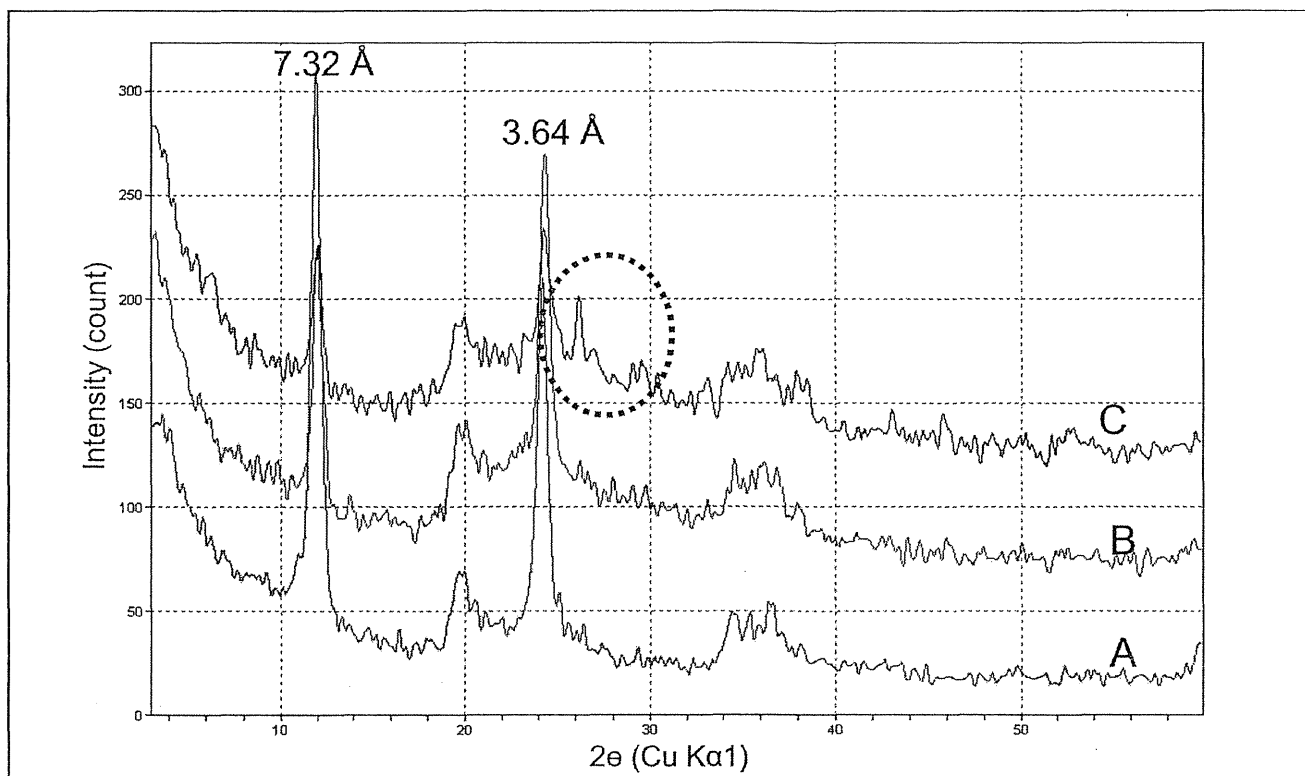


Figura 11. Difractometría de rayos X. A: crisotilo natural. B: pH alcalino. C: pH ácido.

pasadas las 6 hs de ensayo, las fibras redujeron en promedio su largo un 83% y su ancho un 95%.

3. La dispersión en aire cambió la morfología y disminuyó el tamaño de las fibras hasta alcanzar los tamaños críticos que afectan la salud humana. La reducción promedio del largo fue del 52% y 16% de ancho, respecto a las fibras naturales.
4. Al ser sometidas al ensayo en autoclave (simulando una degradación por envejecimiento) se produjeron cambios físicos y químicos. A pH neutro las fibras se fracturaron, redujeron su tamaño hasta llegar a los que son nocivos para la salud humana. A pH alcalino solo se registraron cambios morfológicos. En medio ácido las fibras presentaron signos de corrosión, cambios de tonalidades relacionadas con la desferriización del crisotilo, aumento de la fragilidad y disminución del tamaño. En este último ensayo se

observaron los mayores cambios en cuanto al tamaño, con una reducción en su largo del 83%.

5. Con las técnicas empleadas no es posible estimar un período en el que se producen los cambios en las fibras. Pero el aumento del tiempo, de la temperatura y la rigurosidad de las condiciones químicas generaron transformaciones que sobrepasan los límites de peligrosidad del material analizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur, a la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba, a la Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires y al CONICET por el apoyo brindado. Agradecemos también la colaboración del Sr. Rodolfo Salomón en la compaginación de las láminas y en el armado y puesta a punto del túnel de acrílico vertical de circulación de aire.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABÚ SHAMS, K., BOLDÚ, J., TIBERIO G., TABAR A., FERNÁNDEZ INFANTE B. Y LABARTA N. 2005.
Registro de enfermedades respiratorias de origen laboral en Navarra.
Anales del Sistema Sanitario de Navarra, 28 (1): 135-143.
- ANTHONY, J.W., BIDEAUX, R.A., BLADH, K.W. AND NUCHOLS, M.C. 1995.
Handbook of Mineralogy. Silica, Silicates.
Ed. Mineral Data Publishing. Tucson, Arizona. Vol. II. Part 1 and 2: 904 pp.
- BATTISTA R., SPELTINI C., CHOREN H., SOTA J. Y CARRIZO E. 2006.
Reciclado de residuos conteniendo asbestos. Transformación de fibras de asbestos por sinterizado en matriz cerámica.
Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP).
Universidad Tecnológica Nacional, San Rafael, Mendoza. ISBN 950-42-0056-7
- BONALUMI, A. A. Y GIGENA, A. A. 1987.
Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas del departamento Calamuchita, provincia de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. 42 (1-2):73-81.
- DOMINGUEZ E. Y ULLMAN R., 1996.
Ecological Tricks made with clays and steel dust pollutants.
Applied clay science, 11: 237-249.
- ESCAIOLA, M.P. 1994.
Faja Ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti-Yaco y Ea. San Miguel, dpto. Calamuchita, prov. de Córdoba.
Tesis Doctoral, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 277 p, Córdoba.
- ESCAIOLA, M.P. 1997.
Evolución metamórfica de la secuencia ofiolítica de la faja ultramáfica occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba entre los 31° 50' y 32°30' de latitud sur. República Argentina.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 52(3): 322-332.
- HURLBUT, C.S. 1974.
Manual de Mineralogía de Dana.
Ed. Reverté SA. Barcelona. España: 653 pp.
- INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD) 1986.
Mineral Powder Diffraction File Data book: 228-229, Swarthmore, Pennsylvania, U.S.A.
- KRAEMER, P., ESCAIOLA, M. Y MARTINO, R. 1995.
Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40'LS - 32°40'LS).
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 50 (1-4): 47-59.
- LUIS, G., HERNÁNDEZ, C., RUBIO C., FRÍAS I., GUTIÉRREZ A. Y HARDISSON A. 2009.
Toxicología del asbesto.
Cuaderno médico forense, 15(57): 207-213.
- ROSS, M. 1981.
The geological occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos.
In: Amphiboles and other hydrous pyriboles - Mineralogy. Ed. Ribbe P.H. Mineralogical Society of America. Chapter 6: 279-320.

- VILLAR, M.L. 1975.
Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas de la República Argentina y su significado metalogénico.
2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, 3: 135-156, Buenos Aires.
- VILLAR, M.L. 1985.
Las Fajas Ultrabásicas Argentinas, tipos de ultramáficas y Metalogenia.
4º Congreso Geológico Chileno, Actas, 4-44: 610-633. Antofagasta, Chile.
- WICKS, F.J. 1975.
Mineralogy, chemistry and crystallography of chrysotile asbestos.
In: Short course in mineralogical techniques of asbestos determination. Mineralogical Association of Canada. Quebec. Ed. Ledoux R.L. Section I. Part B: 35-78.
- WICKS, F.J. AND WHITTAKER, E.J.W. 1975.
A reappraisal of the structures of the serpentine minerals.
The Canadian Mineralogist. 13, 227-243.
- WICKS, F. Y O'HANLEY, D. 1988.
Serpentine minerals: structures and petrology.
En: Bailey S.W (Ed) Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas). Reviews in Mineralogy 19: 91-167.
- WINCHELL, A.N. 1933.
Elements of optical mineralogy. An introduction to microscopic petrography. Part. II. Description of minerals.
Ed. John Wiley & Sons, Inc. London: 459 pp.